

계측 및 수치해석에 의한 초기담수시 사력댐 코어존 수압할렬 안정성 분석 Evaluation of hydraulic fracturing of rockfill dam during first filling by measurement and numerical analysis

이종욱¹⁾, Jong-Wook Lee, 조성은¹⁾, Sung-Eun Cho, 김기영¹⁾, Ki-Young, Kim, 임희대²⁾, Heui-Dae Lim

¹⁾ 한국수자원공사 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher, Dam Safety Research Center, K-water

²⁾ 충남대학교 토목공학과 교수, Professor, Civil Engineering Dept. of Cungnam Natioanl University

SYNOPSIS : In this study load transfer and hydraulic fracturing of core zone of object rockfill dam are estimated and monitored by a numerical analysis and a instrumentation immediately after the construction and during the first impounding. The estimated results are compared with the monitored results. It reveal that the core zone is safe on the hydraulic fracturing.

Key words : Rockfill Dam, Numerical analysis, Monitoring, Load Transfer, Hydraulic fracturing

1. 서 론

연구대상 시설물은 그림 1과 같이 높이 37.3m, 길이 390.5m의 중앙심벽형 사력댐으로 유수전환을 위해 댐 우안측에 가배수 암거와 이를 이용한 취수탑을 포함한 하류 용수 공급설비, 홍수조절을 위한 댐 좌안측의 여수로, 기타 부대시설 등으로 구성된다. 연구 대상댐의 가능최대 홍수위는 EL. 113.5m이며, 상시만수위 EL. 109.70m에서 총 8.47×106m³을 저류하며 저수위 EL. 91.60m 이하의 사수량을 제외한 유효 저수량은 8.05×106m³이다. 본댐 축조는 '05년 11월 시작되어 약 12개월 후인 '06년 11월 축조를 완료하여 '06년 11월부터 담수를 시작하였다.

담수 시작 후 9개월이 경과한 '07년 9월에 초기 담수 중 최고수위의 96.7%에 해당하는 EL.108.7m에 도달한 후 EL.105.9m('08년 3월)로 감소하였다(그림 2. 참조). 담수속도는 담수 초기에는 1.0m/day를 나타내었고 '07년 8월~9월의 집중호우시기에 1.0m/day를 약간 상회하였다.

본 연구에서는 축조 직후와 초기 담수 중 사력댐 코어존의 응력전이와 수압할렬 거동을 수치해석으로 예측하고 계측결과와 비교분석하였다.

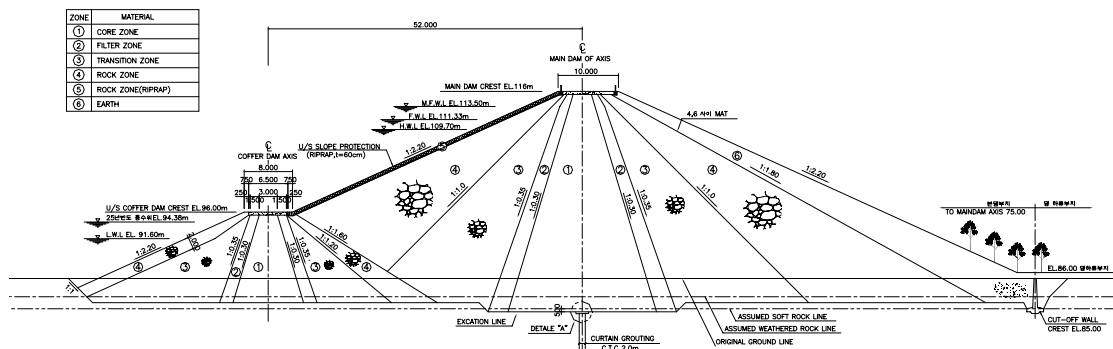


그림 1. 연구 대상댐 표준단면도

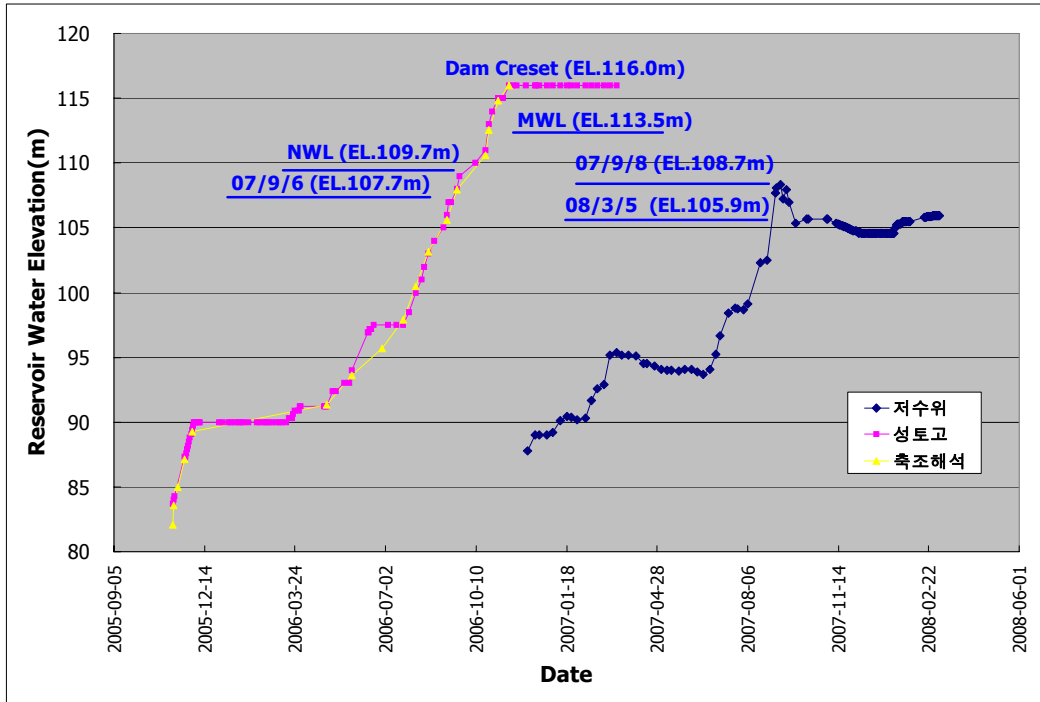


그림 2. 대상댐의 성토 및 초기담수 과정

2. 계측 및 수치해석

2.1 계측현황

대상댐의 건설에 따른 시공 중, 준공 후, 담수시의 코어존의 과잉간극수압과 토압분포를 계측하기 위하여 그림 3과 같이 토압계와 간극수압계를 설치하였다. 토압계와 간극수압계는 동일지점에 설치하여 유효응력을 파악할 수 있도록 하였으며 횡단면방향과 심도에 따른 압력분포를 측정하기 위해 코어존의 상류측, 중앙부, 하류측과 표고 85m, 95m 105m의 7개 지점에 설치하였다.

토압계는 주응력과 주응력의 방향을 파악할 수 있도록 1개 지점에 토압측정면의 설치방향을 수평면에서 45°, 135°, 수평면의 3개를 1조로 하여 총 21개의 토압계를 설치하였고 간극수압은 총 7개소를 설치하였다.

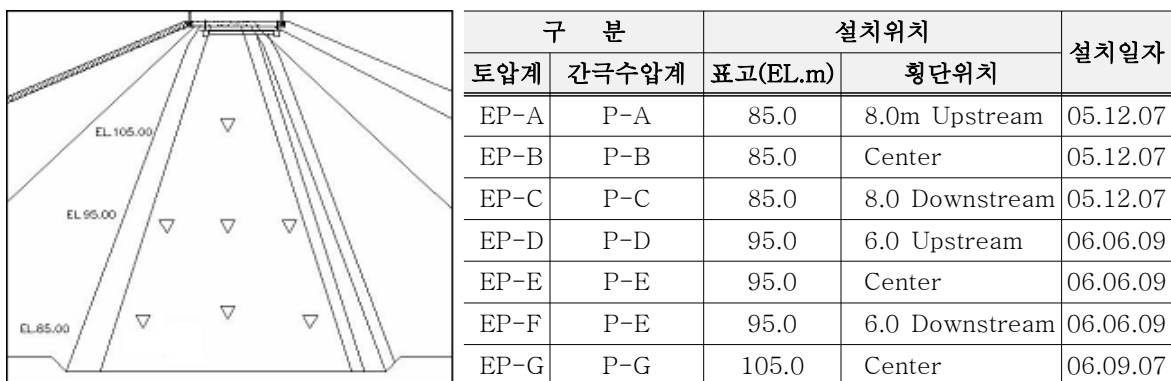


그림 3. 토압과 간극수압의 계측현황

2.2 해석조건과 유한요소망

해석 대상댐의 축조직후와 초기담수에 의한 토압과 간극수압 거동을 예측하기 위해 유한요소(FEM)해석을 실시하였다. 축조재료의 응력-변형 특성은 댐의 응력-변형해석에 대한 적용성이 검증된 쌍곡선 모델을 이용하였으며 해석에는 실시설계에 적용한 파라미터를 이용하였다. 쌍곡선모델은 Kondner(1963)가 제안하여 Duncan 등(1980)이 발전시킨 흙의 구성모델이다.

댐의 축조해석은 증분해석법(increment analysis)으로 상류측 가물막이댐을 포함하여 22단계로 성토하는 것으로 모델링 하였다. 증분해석법은 중량의존 해석법보다 합리적이며 실측치에 더 근접한 것으로 확인되었다(Clough 등 1967; Duncan, 1996)

초기 담수시의 해석은 담수시의 저수위 기록을 참조하여 최고수위의 96.7%인 담수 중 최대상승 저수위인 EL.108.7m 까지의 저수위를 적용하여 해석하였다. 댐의 축조해석 및 초기 담수시 해석은 그림 3과 같은 유한요소망을 작성하여 전응력해석법을 적용하여 해석하였다.

표 1. 해석 대상댐의 쌍곡선 모델 입력 매개변수

Item	Zone1 Core	Zone2 Filter	Zone3 Transition	Zone4 Rock	Zone5 Planting Zone
Poisson's ratio, ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Loading, K	200	200	600	600	400
Loading exponent, n	0.6	0.4	0.4	0.4	0.35
Bulk modulus, K_b	100	125	175	210	400
Bulk modulus exponent, m	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2
Atmospheric pressure, $P_a(\text{kgf/cm}^2)$	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
Failure ration, R_f	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9
$c(\text{kgf/cm}^2)$	2.9	0.0	0.0	0.0	1.0
$\phi(^{\circ})$	29	39	42	42	0
Unload-reload modulus, K_{ur}	200	200	600	600	400
Unit Weight(tf/m^3)	1.87	1.95	2.15	1.95	1.95

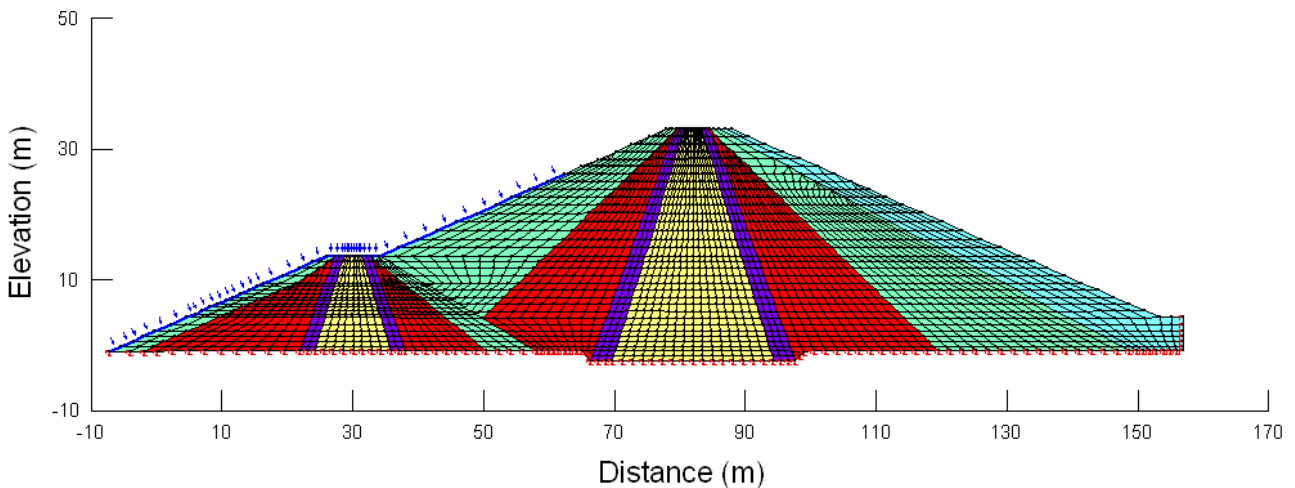


그림 4. 유한요소 해석망

2.3 해석결과

쌍곡선 모델을 이용한 수치해석으로 구한 축조 후의 수직응력(σ_y), 수평응력(σ_x), 간극수압(u), 담수 직후의 수직응력(σ_y), 수평응력(σ_x)은 다음의 그림 5~9와 같다.

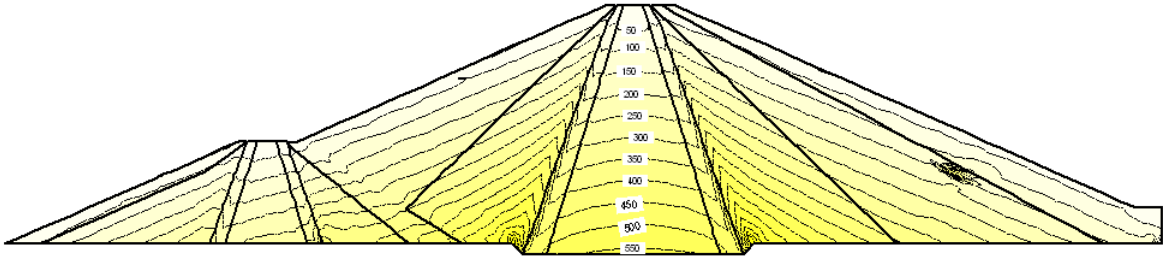


그림 5. 수치해석에 의한 축조 후 전수직응력(σ_y , kPa=0.1kgf/cm²)

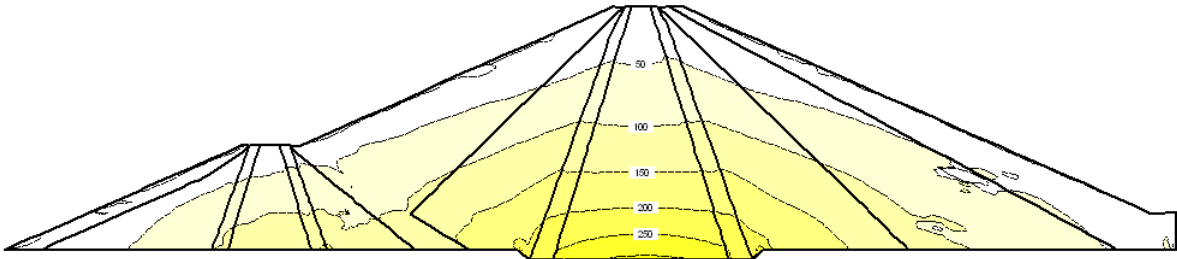


그림 6. 수치해석에 의한 축조 후 전수평응력(σ_x , kPa=0.1kgf/cm²)

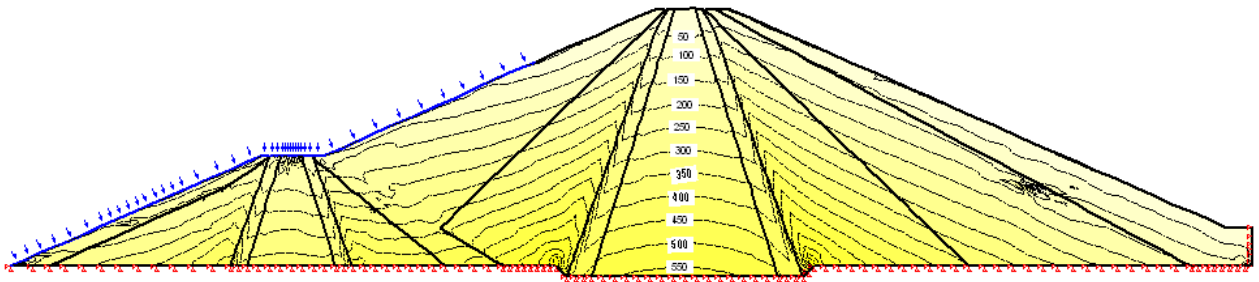


그림 8. 수치해석에 의한 초기 담수시의 전수직응력(σ_y , kPa=0.1kgf/cm²)

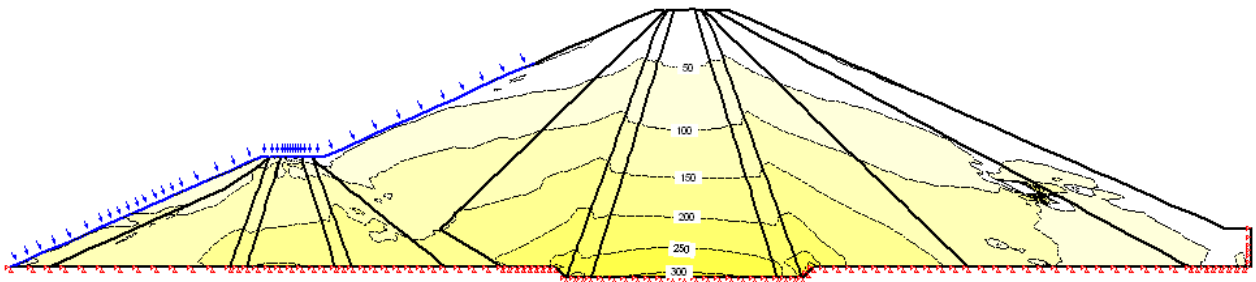


그림 9. 수치해석에 의한 축조직후 전수평응력(σ_x , kPa=0.1kgf/cm²)

3. 계측치와 해석치의 비교분석

3.1 응력전이

응력전이 현상은 강성이 서로 다른 두 재료의 경계부근에서 강성이 작은쪽의 하중을 강성이 큰 재료가 부담하여, 강성이 작은 재료에는 평균응력보다 작은 응력이 걸리고 강성이 큰 재료에는 평균응력보

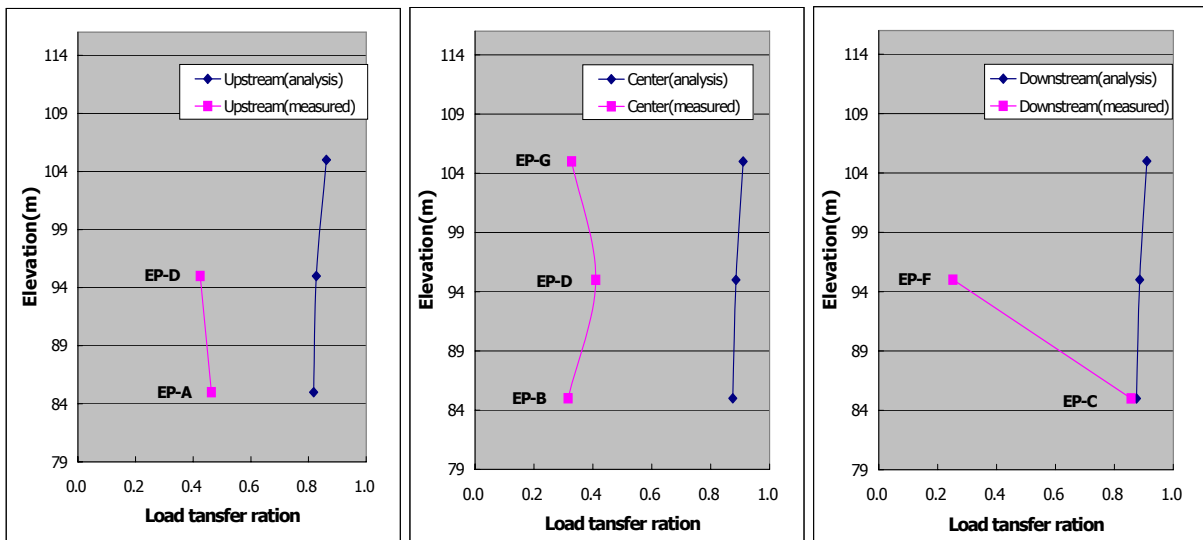
다 큰 응력이 걸리는 현상이다. 사력댐의 경우 각 존의 강성차와 종단방향의 계곡의 형상 및 경사에 의해 여러 가지 모드의 응력전이가 발생한다(Squier, 1970).

본 연구에서는 댐의 횡단면에서 축조재료의 강성차에 따른 코어존의 응력전이율을 분석하였다. 응력전이율의 분석에는 다음의 식 (1)과 같이 Kulhawy와 Gurtowski(1967)가 정의한 지표를 이용하였다. 응력전이율은 이론적인 토압에 대한 발생 토압의 비율이며 그 값이 1 이하이면 토압의 감소를 나타낸다. 토압이 감소하여 담수시의 저수압보다 작아지면 수압할렬이 발생할 가능성이 있다.

$$LTR = \frac{\sigma_1}{\gamma_t h} \quad (1)$$

여기서, LTR : 응력전이율(Load transfer ratio), σ_1 : 최대 주응력, γ_t : 습윤단위중량, h : 성토고

대상댐 코어존을 상류면, 중앙부, 하류면으로 나누어 계산한 계측치와 해석치에 의한 응력전이율은 그림 10과 같다. 해석치에 의한 코어존의 응력전이율은 0.82~0.91을 나타내었으나 계측치는 0.31~0.86을 나타내어 계측치와 해석치는 큰 차이를 나타내었다. 이것의 원인으로서는 해석에 이용한 파라미터와 실제의 파라미터의 차이, 계측기의 오차 등을 생각할 수 있다. 계측에 의한 응력전이율을 보면 상류측에서는 0.42~0.46 이상, 중앙부에서는 0.32~0.41, 하류측에서는 0.25~0.86을 나타내어 EP-C(하류측, EL.85m)는 해석에 의한 응력전이율과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 토압계의 신뢰성을 검토해보면 EP-C를 제외한 나머지 토압계의 측정치가 전반적으로 과소평가된 것으로 추정된다.



(a) Uptream (b) Center (c) Downstream

그림 10. 계측과 해석에 의한 축조 후(06.11.15) 응력전이율

3.2 수압할렬

수압할렬은 많은 필댐의 파괴에 이르게 하는 집중 누수의 원인으로 규명되었다.(Kjaernsli 등, 1968; Vaughan 등, 1971; Seed 등, 1976; Sherard, 1986) 수압할렬은 부등침하로 인한 크랙의 발생과 아칭과 응력전이로 인한 토압의 감소가 발생하였을 때 담수가 이루어져 수압이 토압보다 크게 되면 수압할렬이 발생하고 기존 크랙이 확장되어 집중누수로 발전되는 현상이다.

Nobari 등(1973)은 실내시험을 통해 파괴모드, 할렬면의 방향과 수압할렬 중에 파괴가 진행되는 형

태를 연구하였다. 연구결과 수압할렬은 아칭으로 인한 코아의 전응력이 담수에 의한 수압보다 작을 경우 최소주응력면에서 유효응력이 음수가 되어 인장파괴가 일어남으로써 발생한다고 결론을 내렸다.

Jaworski 등(1982)는 Teton댐 파괴를 조사하기 위해 다짐토에 대한 할렬시험을 실시하여 수압할렬 압력(P_f)을 식 (3)과 같이 제시하였으며 본 연구에서는 겉보기 인장강도(σ_{ta})를 무시하여 안전측으로 고려하였다.

$$P_f = m\sigma_h + \sigma_{ta} \quad (3)$$

여기서, m 은 수평응력과 할렬압력의 선형함수의 경사, σ_h =주입공 형성전 최소주전응력, σ_{ta} 는 겉보기 인장강도이다.

대상댐의 초기 담수 중 2007년 9월 8일 최대수위(EL.108.7m)에서의 수압할렬의 안정성을 분석하기 위해 그림 11과 같이 상류면에서의 계측 및 수치해석에 의한 최대주응력과 최소주응력을 저수압 및 계측에 의한 간극수압과 비교하였다. 저수압 또는 간극수압보다 최대주응력(σ_1)이 작으면 댐의 상하류 방향에 평행한 수평면에 수압할렬이 발생함을 의미하며 최소주응력(σ_3)이 작아진 경우에는 댐축방향으로의 수직방향으로 수압할렬이 발생함을 의미한다.

토압계와 같이 설치한 간극수압계의 측정결과 간극수압은 저수압보다는 작은 값을 나타내어 정상침투 상태에 아직 도달하지 못한 것으로 나타났으며 이것은 코어존의 투수성보다 상대적으로 담수속도가 빠르기 때문이며 3 내지 5년 후에는 정상상태에 도달하여 저수압에 해당하는 간극수압을 받게 될 것이다.

해석결과와 계측결과를 통해 수압할렬의 발생 가능성을 검토한 결과 최대주응력과 최소주응력이 저수압과 간극수압 보다 크기 때문에 수압할렬의 발생 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

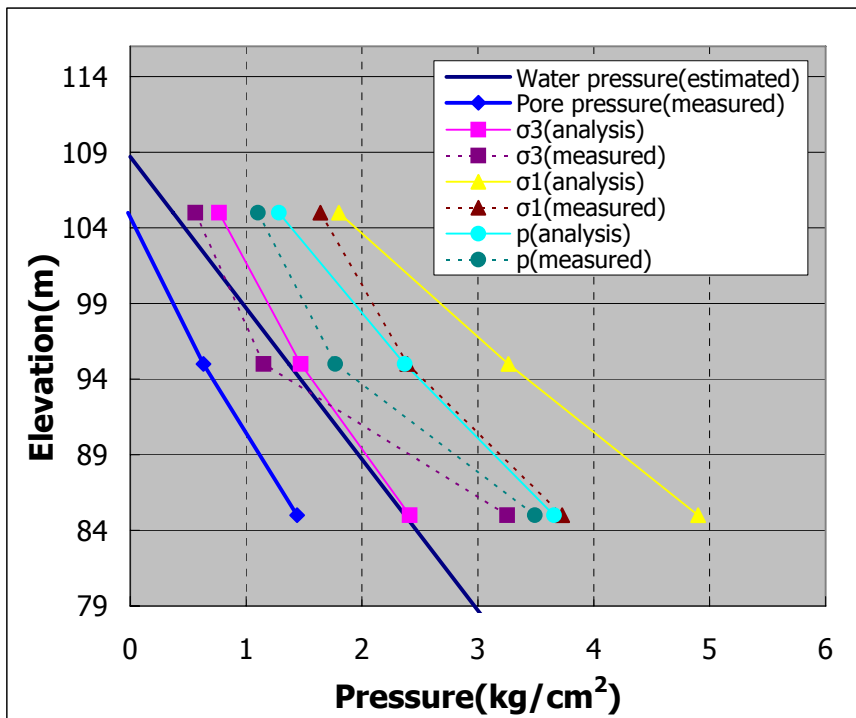


그림 11. 코어존 상류면에서의 수압할렬의 분석(2007.9.8, EL.108.7m))

4. 결론

축조 직후와 초기 담수 중 사력댐 코어존의 응력전이와 수압할렬 거동을 수치해석으로 예측하고 계측 결과와 비교분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 축조 직후 계측에 의한 응력전이율을 보면 상류측에서는 0.42~0.46 이상, 중앙부에서는 0.32~0.41, 하류측에서는 0.25~0.86을 나타내어 EP-C(하류측, EL.85m)는 해석에 의한 응력전이율과 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 이 결과를 바탕으로 토압계의 신뢰성을 검토해보면 EP-C를 제외한 나머지 토압계의 측정치가 전반적으로 과소평가된 것으로 추정된다.
- 2) 토압계와 같이 설치한 간극수압계의 측정결과 간극수압은 초기 담수에 의한 저수압보다는 작은 값을 나타내어 정상침투상태에 아직 도달하지 못한 것으로 나타났으며, 이것은 코어존의 투수성보다 상대적으로 담수속도가 빠르기 때문이며 3 내지 5년 후에는 정상상태에 도달하여 저수압에 해당하는 간극수압이 예상된다.
- 3) 해석결과와 계측결과를 통해 초기담수 중 최대 수위에서의 수압할렬의 발생 가능성을 검토한 결과 최대주응력과 최소주응력이 저수압과 간극수압 보다 크기 때문에 수압할렬의 발생 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Clough, R.W. and Woodward, R.J.(1967), "Analysis of embankment stress and deformation", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.93, No.SM4, pp.529-549
2. Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K.S. and Marby, P.(1980), "Strength, Stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movements in soil mechanics", *Report No. UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley*, pp.1-65,
3. Duncan, J.M.(1996), "State of the Art : Limit equilibrium and finite element analysis of slopes", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.122, No.7, pp.557-596
4. Jaworski, G.K., Duncan, J.M. and Seed, H.B.(1981), Laboratory study of hydraulic fracturing", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol7, No.GT6, June, pp.713-732
5. Kjarernsli, B. and Toblaa, I.(1968), "Leakage through horizontal cracks in the core of hyttejuvet dam", *Norwegian Geot. Inst. Pub.*, N80, Oslo.
6. Kondner R.L(1963)., "Hyperbolic stress-strain response : Cohesive soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division of ASCE*, Vol.89
7. Kulhawy, F.H., and Gurtowski, T.M.(1967), "Load transfer and hydraulic fracturing in zoned dams", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 102, No.GT9, Sept., pp.963-974,
8. Nobari, E.S., Lee, K. L., and Duncan, J.M.(1973), "Hydraulic fracturing in zoned earth and rockfill dams", Contract Report S-73-2, *US Army Engineer Waterways Experiment Station*, Vicksburg, Miss., Jan.,
8. Seed, B. and Duncan, J.M(1981)., "Teton dam failure a retrospective review", *Proc. of 10th Inter. Conf. SMFE*, Vol.3, 1981
9. Sherard J.L.(1986), "Hydraulic fracturing in embankment dams". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 112, no. 10, pp. 905-947
10. Squier, L.R.(1970), "Load Transfer in Earth and Rockfill dams", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE*, Vol.96, No. SM1, Jan., pp.213-233, 1970
11. Vaughan, P.R.(1971), "The use of hydraulic fracturing tests to detect crack formation in embankment dam cores", *Interim Report, Department of Civil Engineering, Imperial College*, London, England